

Modelando la inundación pluvial por escurrimiento superficial urbano y de la cuenca en la Ciudad de México

Modeling the pluvial flood by urban surface runoff and the basin in Mexico City.

Clemencia Santos-Cerquera¹

Para citar este artículo: Santos-Cerquera, C. (2020). Modelando la inundación pluvial por escurrimiento superficial urbano y de la cuenca en la Ciudad de México. UD y la Geomática, (15), PP-PP.

Fecha de envío: 15 de agosto de 2019

Fecha de aceptación: 20 de diciembre de 2019

Resumen

La Ciudad de México presenta como segundo peligro las inundaciones (el primero lo constituyen los sismos); por ello, la presente investigación se orienta a calcular las posibles zonas de inundación a partir del reconocimiento de los escurrimientos superficiales urbanos y aportación de la cuenca, mediante los modelos digitales de terreno y superficie e imágenes de satélite, en la cuenca donde pertenece la alcaldías en estudio de la Ciudad de México, la cual tiene una densa zona urbana de nivel económico alto a medio alto con algunas excepciones de bajo y zona de barrancas. Se emplean diferentes métodos a partir de la información disponible y gratuita, porque es realmente la forma de hacer investigación en países en vía de desarrollo. El resultado evidencia, en primera instancia, que los procesos automatizados son una herramienta de partida, pero con un análisis detallado se logró hacer mejoras a los modelos de terreno y superficie considerando las construcciones,

¹ Ingeniero Catastral y Geodesta. Maestría en Ingeniería Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México. Doctorado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Correo electrónico: csantos@liur-unam.com

lo que lleva a una revisión minuciosa de los procesos ya diseñados, así como la comparación de los productos existentes; en ese sentido, se dispone de información para la toma de decisiones frente a los puntos que por esta problemática requieren mayor atención en su sistema de drenaje.

Palabras clave: alcaldía, imágenes de satélite, radar, modelos digitales de terreno.

Summary: Mexico City presents floods as the second danger, the first being earthquakes, which is why the present investigation is aimed at calculating the possible flood zones from the recognition of urban surface runoff and the basin, using digital terrain models and surface in the basin to which belongs the study zone that has a dense urban area of high to medium high economic level with some exemptions of low and area of ravines.

Different methods are used based on the information available and free because it is really the way to do research in developing countries.

The result evidences in the first instance that the automated processes are a starting tool, but with a detailed analysis it was possible to make improvements to the terrain and surface models considering the constructions, which leads to a meticulous revision of the already designed processes, as well like, the comparison of existing products; In this way, information is available for the decision making process in front of the points that, due to this problem, require more attention in its drainage system.

Keywords: Municipality, Satellite images, Radar, Digital terrain models.

Introducción

México presenta una precipitación² anual de 740 mm en promedio de los cuales el 21 % corresponde en su ciclo hidrológico a escorrentía, pero en su territorio existe una gran variedad de climas y disponibilidad del recurso hídrico; para el periodo 2000-2015 representó el 60 % al 99 % la pérdida a nivel nacional por daños causados por fenómenos hidrometeorológicos (Arreguín y Cervantes, 2017). De igual forma, la Ciudad de México se localiza dentro de la cuenca³ del mismo nombre, en su territorio presenta cambios con isoyetas que varían 400 mm aproximadamente; está conformada por dos zonas clasificadas en suelo *urbano y de conservación* (DOF, 1987), declarado, como su nombre lo indica, para ser protegido por su valor ambiental para la propia zona metropolitana. La primera es cada vez más densa y la segunda es un área que sufre constantes ataques por la expansión urbana y la creciente agricultura que impacta la zona forestal, con lo cual se reducen sus hectáreas; esto conlleva la respectiva tala de árboles, aspecto que ocasiona mayor arrastre de material que llega a ocasionar diversos impactos en la zona urbana y en barrancas, e incrementar el peligro de inundaciones⁴ cuando se presentan fallas en la infraestructura hidráulica.

Respecto al último factor, Domínguez (2000) ya reconoce que

² “La precipitación que ocurre en una zona no es constante y el escurrimiento que se genera depende en gran medida de la extensión donde tiene lugar y de sus características (tamaño, pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, etc.). [...] la precipitación se caracteriza como una altura o lámina; de esta manera es posible comparar la altura de la lluvia en diferentes puntos de una cuenca, o bien, obtener un promedio. [...] En México es común expresarla en mm, mientras que en los Estados Unidos de América, lo hacen en pulgadas” (Cenapred, 2014). **INDICAR PÁGINA DEL SEGMENTO CITADO**

³ “La cuenca es una zona de la superficie terrestre donde, si fuera impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ella tenderían a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida” (Cenapred, 2014, p. XX). **INDICAR PÁGINA DEL SEGMENTO CITADO**, pero no es impermeable, entonces se evapora, se absorbe según el tipo de suelo, se escurre y se atrapa en pequeñas depresiones del terreno que de acuerdo con su volumen y profundidad pueden ser encharcamientos a inundaciones mayores.

⁴ Se considera inundación “aquel evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura” (Cenapred, 2014). **INDICAR PÁGINA DEL SEGMENTO CITADO**

[...] probablemente, por la velocidad de crecimiento de la urbanización, ‘las soluciones’ se han construido después de que se presentan las grandes inundaciones. Dichas soluciones comprenden obras de protección, como el albardón de Nezahualcoyotl, de regulación de avenidas como el sistema de presas del poniente y diversas lagunas en la parte baja de la ciudad y obras de descarga como el Emisor del Poniente, el Gran Canal y el Emisor Central. Sin embargo las inundaciones en Ciudad de México son históricas (López, 2011; Salazar, 2011; Connolly, 2008; entre muchos otros); se reconocen en mapas, fotografías y relatos, los eventos importantes ocurridos y cómo desde la época prehispánica estaban enfrentando este fenómeno. Sin embargo, como lo menciona Domínguez, (2000),

[...] se derivan de las lluvias de tipo convectivo, típicas en el valle de México, que se caracterizan por su gran intensidad, aunque son de corta duración y extensión. Los principales son los que ocurren en las barrancas, los que se presentan en las vialidades y los que se presentan en zonas bajas. (p. XX)

Y de acuerdo con los informes de Cenapred (2014), las principales causas de inundación son: i) lluvias (de invierno, de verano o convectivas); ii) ciclones tropicales; iii) falla de obras hidráulicas (diseño inadecuado, mala operación o falta de mantenimiento). Pero otros autores, como De Alba y Castillo (2014), Domínguez (2000), Connolly (2008), Santos (2018), agregan a las causas mencionadas por CENAPRED, el crecimiento urbano informal desordenado como factor de riesgo en este fenómeno.

De esta forma y frente al resultado del estado actual del fenómeno de inundaciones en la Ciudad de México, se define el objetivo del estudio: para calcular las zonas de inundación pluvial incluyendo las zonas que contribuyen al escurrimiento superficial

urbano desde las partes altas que pertenecen al *suelo de conservación* en las alcaldías vecinas de la Alcaldía Miguel Hidalgo (zona de estudio).

Metodología

Definición de la zona de estudio

En la Alcaldía Miguel Hidalgo, se encuentran grandes edificios dedicados a actividades económicas y habitacional, con vialidades difíciles por estar en zonas de barrancas, así como un importante y visitado parque de Chapultepec. Es una zona con mucho movimiento vehicular y en cada época de lluvias presenta problemas de inundación; sin embargo, no es la más impactada, pero es interesante porque a pesar de no estar en la zona más plana de la ciudad, presenta la problemática y ocasiona impactos económicos, así como el riesgo de cavernas también en su demarcación (figura 1).



Figura 1. Identificación de la zona de estudio. Área urbana y zona de barrancas

Fuente: elaboración propia a partir del MDT lidar y la imagen *Sentinel 2*

Material de trabajo y procedimiento

Para cumplir con el objetivo planteado se trabaja la información disponible de modelos digitales de terreno a diferentes escalas de análisis, los cuales se generan a partir de información base con los *modelos digitales de elevación de alta resolución* LiDAR, con resolución de 5 m, edición 2011, elaborados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), esta información se proporciona en formatos .xyz (formato de texto que contiene coordenadas UTM y elevación) y GRID, siendo un formato *raster* (imagen). Se genera el modelo de la imagen de radar del satélite *Sentinel 1* y modelos digitales de INEGI, entidad oficial de la cartografía en México. Al compararlos se selecciona el LiDAR interpolado a 1 m por presentar mejor resolución para la temática de análisis (figura 2).

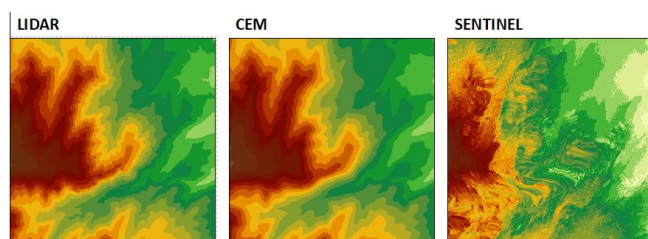


Figura 2. Comparación de MDT disponibles para el estudio

Fuente: elaboración propia con información de INEGI, Sentinel 1

Para el cálculo del peligro por inundaciones se necesita un *raster* que combine la información contenida en el modelo de terreno y superficie. Para esto, al *raster* de superficie se le resta el valor que contiene el modelo digital de terreno, operación que permite obtener todos los elementos que se ubican por encima del nivel de suelo (edificios, vegetación, puentes, entre otros). Del resultado, se seleccionan los objetos con un tamaño superior a 2,5 m por considerarlo una elevación cercana al promedio de una construcción de un nivel. Para eliminar las elevaciones correspondientes a la vegetación se utiliza un

índice normalizado de vegetación (NDVI), este proceso no elimina toda la vegetación (al existir vegetación con diferentes “características”) siendo necesario realizar una limpieza manual. Esta se agilizó utilizando la información lineal de las vialidades ubicadas dentro del área de estudio (se realizó un *buffer* de 3 m y se eliminó todo lo que se encuentra dentro de esta área). Se calculan las pendientes para generar el escurrimiento superficial, al modelar la geomorfología y las construcciones; también se emplean las imágenes del satélite *Sentinel 2* para analizar a detalle el resultado obtenido; finalmente se calculan las zonas de inundación como se explica a continuación.

Las elevaciones ya calculadas, se suman al modelo digital de terreno, quedando así un modelo de terreno con los edificios que afectan la escorrentía pluvial. Al generar la información base, se emplea el modelo creado por Balstrøm y Crawford (2017) (el primero de ellos, profesor adjunto de geoinformática en la Universidad de Copenhague), que:

[...] se basa en el concepto hidrológico de que cada sumidero (punto azul) del paisaje tiene una cuenca hidrográfica local: el área que aporta flujo a ese punto azul y no a otro. Mediante el cálculo del volumen de un punto azul y el área de su cuenca hidrográfica, puede determinar cuánta precipitación se necesita para llenar el punto azul: es el volumen dividido por el área. [...] Se parte de que las lluvias torrenciales [en zonas selladas] tienen una escorrentía casi perfecta, [...] usando la ecuación de balance del agua $P = I + E + Ao + Au + Q$ [donde:] la precipitación (P) es igual al la sumatoria del agua interceptada por la vegetación (I), la evaporación (E), la escorrentía superficial (Ao), la infiltración en el suelo y los sistemas de alcantarillado (Au), el depósito en los embalses locales (Q). En este contexto, los embalses locales son los puntos azules. (ArcGIS, s.f.)

Finalmente se realiza una revisión hemerográfica de los puntos que han presentado inundaciones para corroborar los resultados.

Resultados

La Alcaldía Miguel Hidalgo presenta zonas con una importante posibilidad de inundación dentro de los conglomerados de edificios, así como en los pasos a desnivel. En la figura 3 se representan los escurrimientos superficiales y sitios de inundación por precipitación pluvial y por el aporte de los escurrimientos de las zonas altas de la Alcaldía vecina de Cuajimalpa de Morelos, que desciende hacia la parte baja de la demarcación en estudio. Considerando las concavidades (columpios) y zonas encerradas por construcciones en barrancas, además del sellamiento en la zona urbana, la figura 3 ilustraría el comportamiento que registra.

En la parte superior de dicha figura, se observa el modelo digital que define una de las áreas inundadas y la cantidad de edificios que ocupan esa concavidad del terreno, aspecto que implica un mantenimiento del sistema de drenaje para evitar que se presenten inundaciones mayores a las ya ocurridas, como lo muestra la fotografía del periódico *Milenio* en 2019 de la misma zona. En este punto su desfogue es artificial por un tubo que esta bajo una vialidad de acceso, la misma que sufre congestionamientos por el tráfico diario y como se aprecia en lluvias torrenciales no alcanza a cumplir su función.

De igual forma, en la parte superior de la imagen con menor intensidad de inundación, se encuentran los paso a desnivel que conectan la demarcación de estudio con su vecina puntos que en época de lluvia siempre refieren problemas por inundaciones.

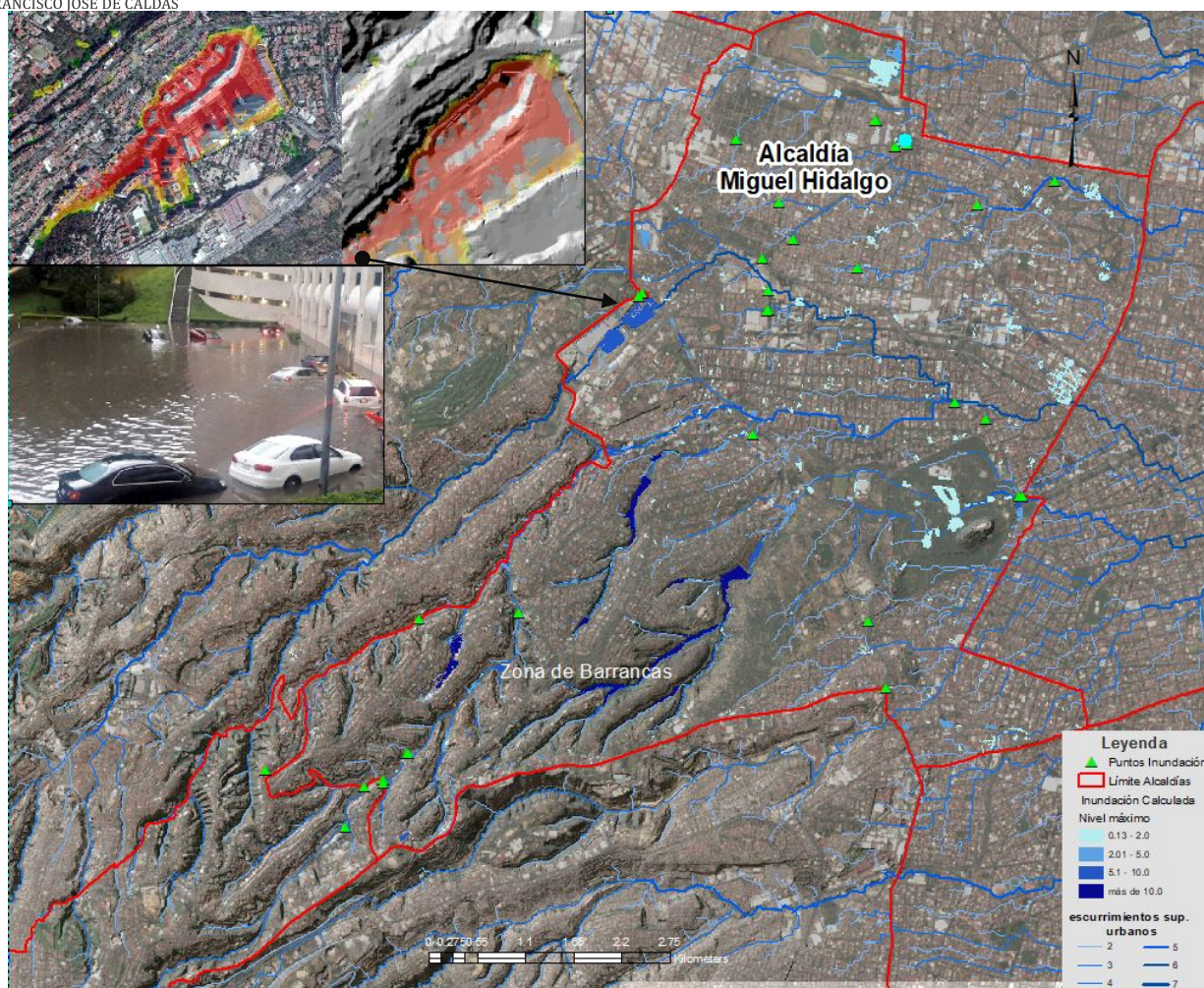


Figura 3. Zonas con diferentes grados de inundación en la Alcaldía Miguel Hidalgo de la Ciudad de México

Fuente: elaboración propia con información LiDAR, imagen *Sentinel 2* y del periódico *Milenio* 2019.

En las fotografías de las cámaras del C5 de la Ciudad de México (figuras 4, 5, 6 y 7) se evidencian puntos críticos de atención por dicho fenómeno que no alcanzan a desfogar el escurrimiento y precipitación por el sistema de drenaje, el cual, en ocasiones realiza el



efecto contrario al desbordarse por su poca capacidad o por la cantidad de arrastre de material de las partes altas que trae el escurrimiento. A esto se suma otro factor: la basura, que obliga a tener un proceso de desazolve y de atención frecuente por parte de Protección Civil y Bomberos en estos puntos de intersección.

Figura 4. Cruce del circuito interior y reforma



Figura 5. Cruce lateral del periférico y constituyentes

Figura 6. Río San Joaquín y Calzada Legaria

Fuente: para todas las fotos es C5 Ciudad de México

Figura 7. Paso a desnivel de periférico y observatorio

Otro aspecto a considerar y se aprecia en el nombre de la figura 6, la mayoría de los ríos que tiene la Ciudad de México están entubados en su parte urbana. Obras que se han



realizado para evitar el desborde e inundaciones anteriores, además de ser utilizados como drenaje que desemboca en las grandes obras de ingeniería ya mencionadas con en este documento.

El área de barrancas presenta el mayor volumen de acumulación de agua como es de esperarse, pero tiene la ventaja de que allí se realiza el proceso de infiltración, lo mismo se da en el parque de Chapultepec. Caso contrario sucede en la zona urbana donde el proceso de escorrentía es cada vez mayor por el sellamiento del suelo, entonces solo queda el proceso de evaporación y la capacidad que tenga el drenaje; sin embargo, por ser obras programadas para menor densidad de ocupación urbana, no alcanza a evitar la inundación en las diferentes depresiones y obras antropogénicas (vialidades, pasos a desnivel, construcción habitacionales y comerciales en zonas de barrancas con gran ocupación que buscan paisaje en un ambiente que cada día pierde su belleza por la expansión urbana).

Discusión de resultados

El crecimiento urbano que invade los espacios ambientalmente importantes para la zona metropolitana de la Ciudad de México evidencia lo mencionado en varias ocasiones por especialistas como Bazant (2008, 2015) y Legarreta (1994), y los problemas que dicha ocupación trae consigo enunciados por Santos (2018); Arreguín y Cervantes (2017) y Domínguez (2000), al afirmar que es un fenómeno en aumento y mientras se siga con este proceso desordenado de expansión, los problemas de inundación aunados a otros más, seguirán creciendo y aumentando las pérdidas económicas no solo de automoviles y viviendas –como se aprecia en las fotografías del documento–, sino de vidas humanas, al igual que mayores recursos para la construcción de las obras que remedien los males.

El modelado del terreno por los diferentes sensores y *software* de procesamiento, como el propuesto por Balstrøm y Crawford (2017), e implementado en ArcGIS, requiere aún de una supervisión para el reconocimiento de estructuras y así como el mejoramiento en la resolución espacial de la información de origen, que permitan definir altura de construcciones y trayectos continuos de vialidades que faciliten o impidan el escurrimiento superficial en zonas urbanas, en zonas naturales como las barrancas que quedan inmersas en zonas urbanas, requieren menor intervención por la propia degradación que presentan, acción que permite al sistema LiDAR calcular su límite.

Conclusiones

El problema de inundaciones generalizado que presenta la Ciudad de México se centra en las vialidades que vienen de las zonas altas y se convierten en verdaderos ríos, al no tener su cauce natural, y si las barreras de muros y contrucciones, también en las vialidades que se encuentran por debajo del interceptor del poniente que corresponde a la zona del periférico hasta Insurgentes, de igual forma ocurre en los pasos a desnivel.

Otro aspecto que se refleja en el estudio es la invasión que sufren las zonas de importancia ambiental, como las barrancas y el *suelo de conservación* que de continuar con el proceso de expansión que presenta la Ciudad de México, las obras necesarias para evitar las inundaciones y encharcamientos serán cada vez más costosas al requerir proyectos de ingeniería más difíciles.

El efecto de las inundaciones y encharcamientos no solo es un aspecto negativo para el propio gobierno de la ciudad, sino que tiene repercusiones en pérdidas económicas y molestia social al retrasar las actividades diarias de la población de esta zona metropolitana.

Por otra parte, se sigue avanzando en la aplicación de las técnicas de percepción remota y los adelantos en los sistemas y sensores de captura de la información, así como en el procesamiento, de tal forma que son ahora herramientas básicas para el estudio de la problemática de la ocupación irregular, del análisis del riesgo y del impacto ambiental que en esta ocasión se aplica al fenómeno de las inundaciones.

Finalmente, establecer una metodología que considere el escurrimiento superficial urbano en su estructura actual, al modelar la superficie con sus depresiones y construcciones que impiden el escurrimiento natural, es un acercamiento a proporcionar la información necesaria para la generación de políticas de gestión del riesgo. Sin embargo, se debe hacer un esfuerzo por parte de las dependencias del Gobierno para la generación y adquisición de información más detallada que permita afinar y mejorar las escalas de análisis en fenómenos de tal importancia.

Referencias bibliográficas

- ArcGIS (s.f.). *Evaluar el riesgo de inundación de los edificios*. Recuperado de <https://learn.arcgis.com/es/projects/find-areas-at-risk-of-flooding-in-a-cloudburst/lessons/assess-flood-risk-to-buildings.htm>
- Bazant, J. (junio-diciembre de 2008). Procesos de expansión y consolidación urbana de bajos ingresos en las periferias. *Revista Bitácora Urbano Territorial*, 13(2), 117-132. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74811925009>
- Bazant, J. (2015). Procesos de transformación territorial en las periferias urbanas. En G. Olivera, *La urbanización social y privada del ejido ensayos sobre la dualidad del desarrollo urbano en México* (pp. 75-102, 219). Cuernavaca, Morelos, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. Recuperado de <http://www.libros.unam.mx/digital/V9/44.pdf>

Balstrøm, T. y Crawford, D. (2017). *Stormwater Screening based on Raster Geoprocessing & Geometric Networks*. Paper presented at Esri User Conference 2017. San Diego, EE. UU.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) (2014). *Inundaciones*. Serie Fasiculos. Ciudad de México. Recuperado de <https://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>

Cortés, F. y Cervantes-Jaimes, C. (2017). Flood Risk Management in Mexico. <https://10.5772/intechopen.69834>. Recuperado 11 de febrero de 2019 <https://www.researchgate.net/publication/319397344>

Connolly, P. (2008). ¿El mapa es la ciudad? Nuevas miradas a la forma y levantado de la Ciudad de México 1628 de Juan Gómez de Trasmonte. *Investigaciones Geográficas*, 66, XX-XX.

De Alba, F. y Castillo O., Ó. (2014). “Después del desastre... viene la informalidad”. Una reflexión sobre las inundaciones en la metrópolis de México. *Revista de Direito da Cidade*, 6(1), 141-167. DOI: 10.12957/rdc.2014.10705

Diario Oficial de la Federación (DOF) (16 de julio de 1987). *Declaratoria que determina la línea limítrofe entre el área de desarrollo urbano y el área de conservación ecológica, el destino de su zona de protección y los usos y destinos para el área de conservación ecológica y para los poblados del Distrito Federal*. Ciudad de México.

Domínguez M., R. (2000). Las inundaciones en la Ciudad de México. Problemática y alternativas de solución. *Revista Digital Universitaria. El Quehacer Universitario en Línea*, 1(2). Recuperado de <http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/proyec1/>

Legarreta, J. (1994). *Efectos ambientales de la expansión de la Ciudad de México 1970-1993*. Ciudad de México, México: Centro de Ecología y Desarrollo A.C. Recuperado de

https://books.google.com.mx/books/about/Efectos_ambientales_de_la_expansi%C3%B3n_de.html?id=zJSzAAAAIAAJ&redir_esc=y

López, M. (2011). *Inundaciones en el valle de México y su exacerbamiento por el impacto del cambio climático*. Ciudad de México: Semarnat, Conagua. Recuperado de https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/varios/Dialogos_por_el_Agua_12-oct-2011/panel_iv/Inunda_VMex8.pdf

Milenio (2019) “MILENIO DIGITAL” Ciudad de México / 18.07.2016 20:54:30

Salazar T., C. (2011). La inundación en el sur de la cuenca de México a través de la imagen cartográfica (1866-1869). *Revista Sielo*, 33(98), XX-XX. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Estéticas.

Santos C., C. (2018). *Áreas críticas de ocupación en suelo de conservación*. México: Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Sedema.